

다자게임에서 발전력제약이 복합전략 내쉬균형에 미치는 영향

論 文

57-1-6

Effect of Generation Capacity Constraints on a Mixed Strategy Nash Equilibrium in a Multi-Player Game

李 光 浩[†]
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - Nash Equilibrium (NE) is essential to investigate a participant's bidding strategy in a competitive electricity market. Congestion on a transmission line makes it difficult to compute the NE due to causing a mixed strategy. In order to compute the NE of a multi-player game, some heuristics are proposed with concepts of a key player and power transfer distribution factor in other studies. However, generation capacity constraints are not considered and make it more difficult to compute the NE in the heuristics approach. This paper addresses an effect of generation capacity limits on the NE, and suggest a solution technique for the mixed strategy NE including generation capacity constraints as two heuristic rules. It is reported in this paper that a mix of the key player who controls congestion in a NE can be transferred to other player depending on the generation capacity of the key player. The suggested heuristic rules are verified to compute the mixed strategy NE with a consideration of generation capacity constraints, and the effect of the generation constraints on the mixed strategy NE is analyzed in simulations of IEEE 30 bus systems.

Key Words : Mixed Strategy, Nash Equilibrium, Transmission Congestion, Generation Capacity

1. 서 론

전력산업에 경쟁과 송전망 개방이 도입되면서 발전력 시장에서 발전사들의 입찰전략이 한층 중요해지고 있다. 발전력 입찰시장의 규칙과 시장운영자(Market Operator, MO)의 원칙이 반영되는 해석모형을 이용하여 발전사는 경쟁사의 예상 전략에 따른 최적의 입찰전략을 선택하려고 한다. 이러한 과정은 상대적 성질이 있어서 게임이론에 의해 해석이 가능하고 각 참여자가 더 이상 전략을 수정하지 않는 안정적인 상태에 이르게 되며 이를 내쉬균형(Nash Equilibrium, NE)이라 한다[1-3]. 따라서 경쟁적 전력시장을 미시적 관점에서 해석하기 위해서 내쉬균형의 계산은 필수적이라 할 수 있다.

내쉬균형을 계산하기 위한 여러 가지 기법들이 연구되고 있으나 송전선 제약 등의 부등식 조건에 의해 나타나는 복합전략(mixed strategy)의 계산, 그리고 게임에 참여하는 숫자가 많아질 때의 균형조건 계산에 대해서는 아직도 만족할 만한 연구결과가 발표되고 있지 않다[2-4]. 복합전략이란 몇 개의 단순전략(pure strategy)을 확률적으로 선택하는 균형상태를 의미하므로 전략의 선택 뿐만 아니라 선택되는 확률값도 계산해야 한다. 발전사 입찰전략 변수의 공간 내에 송전선 혼잡(congestion) 현상이 나타나게 되면 입찰변수 공간은 혼잡과 비혼잡에 따라서 영역이 구분되어 진다[2]. 영역이 분리되는 경계에서는 최적

대응함수에 불연속 부분이 생기고 참여자 보수(payload) 함수의 미분이 불가능해진다[5]. 이러한 영역의 분리 현상으로 인해 복합전략이 나타나는데 분리된 서로 다른 영역에서의 전략을 확률적으로 선택하게 된다.

수리계획법을 사용하여 내쉬균형을 구하는 방법[6]이 가장 널리 사용되고 있으나 전략변수의 전체 영역에서 보수함수가 미분 가능하고 오목성(concave)을 가질 때에만 성립하는 단점을 갖는다. 송전선 혼잡 등의 제약조건이 포함되어 미분이 불가능한 경우에 인공지능 기법[7]을 동원하기도 하지만 완전한 복합전략의 균형상태를 찾지는 못한다. 보수행렬을 정의하고 선형상보성(linear complementarity)을 이용하여 복합전략을 계산하는 연구[3,4,8]도 시도되지만 2차원이라는 행렬의 한계를 벗어날 수가 없다.

송전선 혼잡시에 나타나는 복합전략의 특성을 적용함으로써 미분불가능 영역에서의 미분을 피하면서 균형상태의 조건식을 적용하는 방식이 소개된 바 있다[9]. 복합전략이 갖는 경험적인 두 가지 특성을 균형조건식에 사용하여 주 참여자(key player)의 개념을 도입하고 선로조류 배분계수(power transfer distribution factor, PTFD)의 영향을 분석하여 다자가 참여하는 게임에서의 복합전략 NE를 계산한 것이다.

하지만 이는 송전선 제약만을 대상으로 하고 발전력 제약은 전혀 고려하지 않고 있다. 발전력 제약이란 발전기의 물리적인 최대 한계 뿐만 아니라 점검이나 보수 등에 따라서도 발전전략에 영향을 주는 현실적으로 중요한 요인이기 때문에 NE의 계산에서 반드시 포함되어야 한다. 또한 입찰시장의 경쟁모형으로 공급함수 모형을 사용하고 있는데 입찰 파라미터에 대한 연구결과[10,11]를 적용하면 선

[†] 正 會 員 : 檀國大 電氣工學科 副教授

E-mail : khlee@dku.edu

接受日字 : 2007年 9月 12日

最終完了 : 2007年 10月 22日

형의 공급함수 모형에서 하나의 입찰 파라미터를 선택한다는 가정은 수정할 필요가 있다.

본 연구에서는 쿠르노 모형을 사용하여 발전력 제약의 영향을 분석하고 기존 연구[9]에서 제시한 복합전략에 대한 휴리스틱에 두 개의 휴리스틱을 추가함으로써 발전력 제약이 반영된 복합전략 내쉬균형 계산 기법을 제안한다. 복합전략 NE에 대한 네 가지의 휴리스틱을 이용하여 간단한 사례계통과 IEEE 30모선에 6개 발전사가 참여하는 게임[8]에 적용하여 복합전략에 대한 특성을 확인하며 제안한 해법으로 구한 해가 내쉬균형에 해당되는가를 검증한다.

2. 쿠르노 내쉬균형 계산

2.1 입찰시장의 모형

산업구조를 과점모형으로 분석하는데 쿠르노(Cournot), 버트랜드(Bertrand) 모형이 오래전부터 사용되고 있다. 발전시장에서는 가격뿐만 아니라 최대가능용량 까지도 전략적으로 입찰할 수가 있어서 발전기의 특정 출력이나 가격이 아닌 출력과 가격의 조합으로 표현되는 공급일정(Supply Function)을 제시하는 모형도 사용되고 있다[12].

공급함수 기법을 전력시장에서의 전략변수 선택에 적용하여, 일차함수로 표현되는 공급함수의 절편을 전략변수로 두는 절편전략, 공급함수의 기울기를 전략변수로 가정하는 기울기전략, 그리고 둘을 동시에 선택하는 병행전략 등의 게임모형이 연구되고 있다[10].

하지만 발전참여자가 입찰시에 공급함수를 선택하는 경우, 많은 파라미터를 선택 대상으로 하여 가능한 많은 유연성을 확보하려고 할 것이다. 따라서 병행전략이 보다 현실적인 모형이라 할 수 있는데 병행전략에 대한 내쉬균형은 단순전략으로 다수가 존재해서 오히려 내쉬균형 중에서 선택해야하는 초점(focal point) 문제가 발생한다[1]. 병행전략에서 다수의 내쉬균형 분포를 분석하여 수직에 가까운 입찰함수가 선택되며 이는 쿠르노 내쉬균형과 일치한다[10]. 병행전략에서 내쉬균형이 다수가 되는 문제점을 해결하기 위해 부하의 불확실성을 반영한 확률적 수요함수를 반영하는 시도[11]가 있지만 부하의 불확실성까지 포함하는 것은 본 논문의 주제를 흐리게 할 수 있기 때문에 여기서는 쿠르노 경쟁모형을 사용한다.

2.2 쿠르노 모형의 균형조건

전력시장 참여자를 목적에 따라 구분하면 크게 시장운영자(MO)와 발전사, 2개의 그룹으로 나뉜다. 쿠르노 모형에서는 공급경쟁자가 공급량을 결정하므로 전력시장에서는 발전사가 발전력을 MO에 제시하면 MO는 이를 바탕으로 가격탄력성을 갖는 수요의 최적배분을 계산한다. MO의 목적은 시장거래가치를 뜻하는 사회후생(social welfare)을 극대화하는 것이고 발전사의 목적은 발전에 따른 이익의 극대화이다. MO는 사회후생 극대화는 물론 안정(secure)적인 급전계획이 되도록 여러 제약조건을 고려해야 한다. 이는 다음과 같이 제약조건을 갖는 2차 최적화 문제로 표현된다.

$$Max_{d_i} SW = \sum_{j \in D} (a_j d_j - 0.5 r_j d_j^2) \tag{1}$$

$$s.t. \quad \sum_{i \in G} q_i - \sum_{j \in D} d_j = 0 \tag{2}$$

$$0 \leq T_l \leq T_{l,max} \quad \forall l \in L \tag{3}$$

여기서 발전사 F_i 의 한계비용특성은 $c_i(q_i) = b_i + m_i q_i$ 이고, q_i 는 발전력, b_i 와 m_i 는 비용특성의 계수이다. 부하특성은 수요함수로서 $P_j = a_j + r_j d_j$ 와 같이 나타내며, d_j 는 j번째 부하의 전력, a_j 와 r_j 는 수요함수의 계수이다. D와 G는 각각 부하와 발전사의 집합, L은 전체 송전선 집합, T_l 은 송전선 l에서의 전력조류이다.

한편 발전사 입장에서는 발전력 공급의 매출액에서 발전비용을 뺀 식(4)에서의 이익을 극대화하려 한다.

$$Max_{q_i} \pi_i = p_i q_i - (b_i q_i + 0.5 m_i q_i^2) \tag{4}$$

여기서 π_i 는 발전사 i의 이익을, p_i 는 모선(node) 가격을 나타낸다. 모선가격은 같은 모선에서의 수요함수에 의해 결정되므로 MO가 배분하는 수요전력과 밀접한 관련이 있다.

2.3 송전선 제약 포함 균형

발전사의 이익극대화와 MO의 사회후생 극대화가 균형을 이루는 상태는 각 참여자의 최적조건이 동시에 만족될 때이다. 발전사 3개가 3개의 모선에 위치하는 시장 상황에 대해 균형상태의 조건식을 살펴본다. 부하는 각 모선에 분산되어 있으며 계통은 다음 그림 1과 같다.

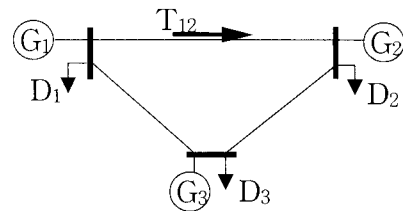


그림 1 3모선 사례계통
Fig. 1 Sample System of 3 buses

각 참여자의 목적함수인 MO의 사회후생과 발전사의 이익이 모두 2차이기 때문에 최적조건은 선형식으로 나타난다. 우선 MO의 최적조건식을 $L = SW + \lambda(\Sigma q_i - \Sigma d_j)$ 로부터 유도하면 다음 식(5)와 같다.

$$\begin{pmatrix} r_1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & r_2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & r_3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ q_1 + q_2 + q_3 \end{pmatrix} \tag{5}$$

여기서 λ 는 수급조건을 나타내는 라그랑지안 승수이다. 발전사(G_i)의 최적조건식에는 식(6)과 같이 발전력 선택에 따른 MO의 수요배분 민감도(sensitivity)가 포함된다.

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial q_i} = -r_i \frac{\partial d_i}{\partial q_i} q_i + (a_i - r_i d_i) - (b_i + m_i q_i) = 0 \quad (6)$$

$$(m_i + r_i s_i) q_i + r_i d_i = a_i - b_i \quad (7)$$

여기서 s_i 는 $\partial d_i / \partial q_i$ 로서 지역적 공급량에 따른 수요의 민감도를 나타내며 식(5)로부터 계산된다.

한편 모선1,2 사이의 선로에 송전선 혼잡을 가정하여 송전선 제약조건($f_{12} \leq T_{12}$)을 포함하는 라그랑지안 $L = SW + \lambda(\Sigma q_i - \Sigma d_j) + \mu(f_{12} - T_{12})$ 에 대해 MO의 최적조건을 정리하면 다음 식(8)과 같다.

$$\begin{pmatrix} r_1 & 0 & 0 & 1h_1 \\ 0 & r_2 & 0 & 1h_2 \\ 0 & 0 & r_3 & 1h_3 \\ 1 & 1 & 1 & 00 \\ -h_1 & -h_2 & -h_3 & 00 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ q_1 + q_2 + q_3 \\ T_{12} - h_1 q_1 - h_2 q_2 - h_3 q_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서 h_i 는 $\partial f_{12} / \partial q_i$ 로서 혼잡이 발생한 선로에 대한 선로조류 배분계수(power transfer distribution factor, PTDF)이고 DC 조류계산식으로부터 얻어진다. 혼잡발생 시 발전사의 최적조건도 식(7)과 동일하나 수요전력의 민감도가 식(8)에 의해 계산됨이 다르다.

송전선 혼잡이 발생하는 경우의 내쉬균형을 계산해 보면 두 가지의 상태가 확률적으로 선택되어지는 복합전략의 균형이 나타난다. 하나는 식(5)가 성립하는 비혼잡(uncongestion) 상태이고 나머지는 식(8)이 성립하는 혼잡(congestion) 상태이다. 여러 참여자 중에서 이러한 두 가지 상태를 선택하는 참여자를 주참여자(key player)라 부른다. 즉, 주참여자는 자신의 이득 극대화를 위해 일정 확률 만큼만 혼잡상태를 유발시키고 나머지는 비혼잡상태를 선택하는 것이다. 따라서 주참여자는 혼잡지배력을 갖는다 할 수 있다.

3. 발전력제약을 고려한 복합전략

3.1 송전선제약시의 복합전략

복합전략의 기본 현상에 대해 두 가지 특성이 소개된 바 있다[9]. 이는 다양한 계통과 다른 조건에서의 복합전략 NE의 사례분석을 통해 송전선 혼잡과 발전사의 위치, 그리고 주참여자 등에 대한 상관관계를 통해 추출된 것이다. 여기서 두 가지의 휴리스틱을 소개하면 다음과 같다.

(1) 현상 I: 복합전략 NE에는 하나의 주참여자가 존재한다.

오직 하나의 주참여자가 2개의 단순전략을 확률 α, β 로 ($\alpha + \beta = 1$) 선택하고 나머지 참여자들은 1개의 단순전략을 선택함을 의미한다. 주참여자가 선택하는 전략 중 하나는 송전선 혼잡이 나타나지 않고 다른 하나는 혼잡을 유발시킨다. 이들을 각각 비혼잡전략, 혼잡전략이라고 구분하여 칭한다.

(2) 현상 II: 주참여자의 위치는 혼잡선로에 대한 PTDF 값이 가장 작은 음수값을 나타내는 노드이다.

PTDF의 값이 가장 작은 음수값을 갖는다는 것은 발전력의 공급을 통해 혼잡선로에 가장 큰 영향을 줄 수 있다는 것이다. 또한 송전선 혼잡현상을 통해서 시장지배력을 행사하기 쉬운 위치에 있다는 의미를 갖는다.

내쉬균형이 계산되는 예를 살펴보기 위해 휴리스틱을 앞의 3모선 계통에 적용해 본다. 계통에서 선로 리액턴스는 $x_{12}=0.1$, $x_{23}=0.05$, $x_{13}=0.1$ 이며 각 모선에서의 수요함수와 한계발전비용은 다음 표 1과 같다.

표 1 발전비용과 수요 특성

Table 1 Demand and Marginal Cost Functions

	수요함수		한계발전비용	
	a	r	b	m
모선 1	70	0.7	10	0.3
모선 2	80	0.5	20	0.4
모선 3	90	0.4	15	0.45

송전선 제약을 고려하지 않고 계산한 쿠르노 균형은 $q_1=84.2$, $q_2=51.8$, $q_3=55.7$ 으로 단순전략이며 선로조류는 $f_{12}=23.8$ 이다. 송전선 제약을 $T_{12}=15$ 로 두면 쿠르노 균형에 혼잡현상이 발생하게 되며 혼잡선로에 대한 PTDF를 계산하면 $[0 \ -0.6, \ -0.4]$ 이다. 따라서 휴리스틱에 의해 발전사 G_2 가 주참여자가 되어 혼잡과 비혼잡의 두 가지 발전력 전략을 사용하게 된다.

이를 계산하면 $q_1=60.23$, $q_2=60.95$ 의 단순전략과 G_2 의 $q_{2u}=56.10$, $q_{2c}=46.30$ 복합전략이 나타난다. 여기서 q_{2u} 는 비혼잡 전략이고 선택의 확률은 $\alpha=0.49$ 이며, q_{2c} 는 혼잡전략이고 확률은 $\beta=0.51$ 이다. 비혼잡전략이 혼잡전략에 비해 큰 값을 갖는 것은 당연한 결과이다. 혼잡선로의 수전단에 위치하는 G_2 가 발전력 공급을 충분히 하면 혼잡선로에서의 조류가 감소하고, 발전력 공급을 줄이면 조류가 증가하여 혼잡발생의 경향이 증가하기 때문이다.

3.2 발전력제약이 포함된 복합전략

발전사의 입찰전략인 발전력이 쿠르노 균형에서 최대용량 보다 크게 나타나면 그러한 균형값은 물리적으로 의미가 없는 것이다. 주참여자가 아닌 일반 참여자의 경우에 최대용량을 넘어선 값이 계산되면 이득의 최적조건식이 선형이므로 최대용량을 선택하는 것이 균형상태가 된다. 하지만 주참여자의 균형상태가 최대용량을 넘어서면 상황은 복잡해진다. 주참여자의 역할을 계속할 것인지에 따라서 NE의 계산방법도 달라진다.

본 연구에서도 다양한 계통과 다른 시장조건에서 발전력 제약을 반영하면서 복합전략 NE을 계산하여 발전력 최대용량과 송전선 혼잡, 그리고 주참여자 등에 대한 상관관계를 분석하였다. 이를 정리하면 발전력제약의 영향에 대해 다음과 같은 두 가지의 휴리스틱과 같다.

(1) 현상 III: 발전력제약을 고려하지 않았을 때 주참여자의 비혼잡전략 값이 최대발전력보다 크면, 발전력제약을 고려할 때 최대발전력이 비혼잡전략으로 선택된다.

발전력제약을 고려하지 않았을 때 주참여자의 비혼잡전략 값이 최대발전력보다 작으면 최종 NE 결과에 영향을 주지 않지만 반대의 경우에는 비혼잡전략이 최대발전력으로 구속(binding)된다는 의미이다. 결과적으로 비혼잡전략이 최대발전력보다 크지 않아야 한다는 것은 당연한 것이지만 주참여자의 역할이 바뀌는가에 대해서는 주목해야 한다. 다자가 참여하는 경우 주참여자가 누가 될 것인지를 모르는 상태에서 NE를 계산하는 것은 극히 힘들기 때문이다.

(2) **현상 IV: 발전력제약을 고려하지 않았을 때 주참여자의 비혼잡전략 값이 최대발전력보다 일정 범위 이상으로 크면, 주참여자 역할이 차선의 PTDF를 갖는 참여자로 바뀐다.**

주참여자의 최대발전용량이 발전력제약을 고려하지 않았을 때의 비혼잡전략 값보다 현저히 작으면 혼잡현상을 유발시키는 기능이 약화되고 다음으로 혼잡선로에 영향을 주는 발전사에게로 혼잡지배력이 넘어간다는 의미이다. 주참여자가 바뀌는 상태이므로 복합전략 NE는 크게 달라진다. 구(old) 주참여자는 자신의 최대발전용량 만을 선택하게 되고 신(new) 주참여자는 두 개의 발전력 입찰로 혼잡과 비혼잡을 각각 발생시키게 된다.

현상 IV에서 주참여자가 바뀔 때의 최대발전력과, 발전력제약을 고려하지 않은 비혼잡전략 값과의 상관관계에 따라서 주참여자가 그대로 유지될 수도 있고 변할 수도 있다. 이러한 경계의 조건을 여기서는 임계발전용량(Critical Generation Capacity)이라 칭한다..

3.3 임계 발전용량

새로 제안된 휴리스틱과 임계발전용량을 이해하기 위해 앞에서의 3모선 계통에 대해 적용해 본다. 쿠르노 균형에서 주참여자 G_2 의 발전전략을 보면 비혼잡전략에서 q_{2u} =56.10, 혼잡전략에서 q_{2c} =46.30 이다. G_2 의 최대발전용량 (q_{2M})이 q_{2u} 보다 크면 균형상태는 그대로 유지되며, q_{2M} 이 q_{2u} 보다 작으면 비혼잡전략은 $q'_{2u} = q_{2M}$ 이 된다.

최대발전용량을 q_{2M} =60, 50, 40으로 각각 두었을 때의 NE를 구하면 다음 표 2와 같다.

표 2 최대발전력에 따른 내쉬균형 결과 (3모선 계통)
Table 2 NE Results at Different Generation Capacity Constraints (3 bus system)

	$q_{2M}=60$		$q_{2M}=50$		$q_{2M}=40$	
	발전(q)	확률	발전(q)	확률	발전(q)	확률
G1	60.23	1.0	59.25	1.0	53.90	1.0
G2 (q_u q_c)	56.12 46.30	0.492 0.508	50 46.04	0.438 0.562	40	1.0
G3 (q_u q_c)	60.94	1.0	61.85	1.0	64.74 64.51	0.189 0.811

발전용량이 60일 때는 3.1절에서의 결과와 동일하고, 50일 때는 주참여자는 G_2 로 그대로 유지되면서 비혼잡전략이 발전용량과 같아지고 혼잡전략은 약간 감소하였다. 발전용량이 40일 때를 보면 주 참여자가 바뀔을 알 수 있다. PTDF에 의하면 선로 T_{12} 의 혼잡을 지배하는 순서가 G_2 다음으로 G_3 이므로, G_2 는 최대용량으로 고정되고 G_3 가 비혼잡(64.74)과 혼잡전략(64.51)을 사용하면서 주참여자의 기능을 한다. 따라서 임계 발전용량은 40~50 사이에 있다.

임계발전용량이란 주참여자의 역할이 바뀌는 기준으로 주참여자의 혼잡전략과 비혼잡전략의 구분이 사라져 같은 값을 가질 때($q_u = q_c$)를 의미한다. 따라서 $q_c = q_M$ 이 되는 상태이며 이 조건에서 비혼잡전략에 의한 선로조류가 선로한계용량 T_{max} 와 같아지게 된다. 이를 해석적으로 구하기는 어려우며 최대발전용량을 변수로 두고 비혼잡전략이 선로한계용량과 같아지는 조건을 계산함으로써 구해진다. 앞의 3모선 계통에 적용하여 계산한 결과, 임계발전용량은 q_{2Mcr} =45.697고 이 때의 발전전략은 q_1 =57.26, q_{2u} =45.697, q_{2c} =45.697, q_3 =62.65 이다.

4. 사례 연구

4.1 적응대상 계통

적용대상 시스템은 IEEE 30모선에 6개 발전기가 연결된 계통[8]을 쿠르노 모형에 적합하게 일부 수정한 것이며 그림 2와 같다. 발전력 시장에 참여하는 발전사를 6개로 두어 6인이 참여하는 게임을 구성한다.

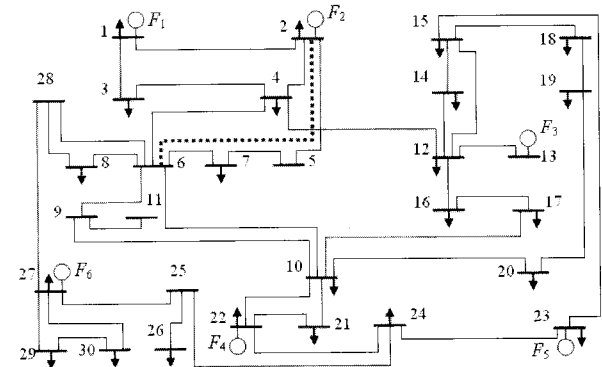


그림 2 6인이 참여하는 IEEE 30모선 계통
Fig. 2 Diagram of IEEE 30-bus system

각 발전기의 한계비용특성은 표 3과 같고 부하는 각 모선에서 다음과 같은 동일한 수요함수를 갖는다. $p_j = 6.0 - 0.2d_j, \forall j \in D$. 모선 1, 4, 6에는 쿠르노 모형에 필요한 모선가격 정보를 부여하기 위해 3개의 수요함수를 추가로 할당하여 부하가 연결된 모선 수는 25개로 수정되었다. 또한 쿠르노 모형에서의 전략변수가 발전력이기 때문에 본 논문의 주제에 맞도록 최대용량 값을 일부 수정하면서 결과를 분석한다.

송전선의 한계용량과 발전력 최대용량이 충분히 크다고 가정한 후 쿠르노 NE를 구하면 각 발전력은 q =[47.35,

58.66, 21.94, 24.61, 21.94, 41.43], 각 부하는 동일하게 8.637MW이어서 전체 215.93MW의 전력이 생산되고 공급된다. 이 때의 모선 가격은 4.273으로 전 모선에서 동일하고, 그림 2에서 점선으로 표시한 모선2와 모선6사이의 선로(T)에서의 선로조류는 24.94MW 이다.

표 3 발전기의 한계발전비용 함수
Table 3 Generator Marginal Cost Functions

발전사	모선	b_i	m_i	q_{Mcr}
1	1	2	0.04	80
2	2	1.75	0.035	80
3	13	3	0.05	40
4	22	1	0.125	30
5	23	3	0.05	50
6	27	3.25	0.01668	**

4.2 발전력제약 포함 내쉬균형

송전선 T에서의 최대용량을 20MW로 낮추면 혼잡상황이 나타나므로 복합전략의 가능성이 존재하며, 내쉬균형 계산을 위해서는 주참여자를 먼저 파악해야 한다. 이를 위해서 혼잡선로에 대한 PTDf를 계산하면 [0.0, 0.06, -0.253, -0.286, -0.271, -0.30]와 같다. 따라서 휴리스틱II에 의해 주참여자 가능성은 PTDf 값의 역순인 G6 -> G4 -> G5 -> ... 순서로 나타난다.

우선 G6를 주참여자로 가정하고 G6의 최대발전용량을 50이라 가정할 후, 식(5)와 식(8)이 각각 확률 α, β 로 만족하는 해를 구하면 쿠르노 NE의 결과는 다음 표 4에서 ①열과 같다. 비혼잡전략이 44.68, 혼잡전략이 40.6 이고 최대용량 50의 범위에 포함되고 비혼잡상태에서의 선로조류가 19.87, 혼잡상태에서의 선로조류가 20.0이다.

만약 G6의 최대용량이 42이라면 앞서 계산한 비혼잡전략은 비현실적이 되어 균형은 새로운 상태로 변하게 된다. 휴리스틱III에 의해 비혼잡전략을 42로 고정하고 NE 조건식을 풀면 표 4에서 ②열과 같다. 이때 비혼잡상태에서의 선로조류는 19.99 이고 혼잡상태 선로조류는 20.0이며 주참여자는 여전히 G6 임을 알 수 있다.

표 4 최대발전력에 따른 내쉬균형 결과 (30모선 계통)
Table 4 NE Results at Different Generation Capacity Constraints (30 bus system)

	① $q_{6M}=50$		② $q_{6M}=42$		③ $q_{6M}=38$	
	발전(q)	확률	발전(q)	확률	발전(q)	확률
G1	42.03	1.0	42.06	1.0	41.94	1.0
G2	47.25	1.0	47.11	1.0	46.56	1.0
G3	23.39	1.0	23.65	1.0	24.11	1.0
G4 $\begin{pmatrix} q_u \\ q_c \end{pmatrix}$	25.19	1.0	25.30	1.0	25.56 25.18	0.8441 0.1559
G5	23.36	1.0	23.60	1.0	24.06	1.0
G6 $\begin{pmatrix} q_u \\ q_c \end{pmatrix}$	44.68 40.60	0.8644 0.1356	42.00 40.42	0.8586 0.1414	38.00	1.0

4.3 임계발전용량 계산

주참여자 G6의 최대용량을 38MW로 낮추면서 G6를 주참여자로 가정하고 계산하면 NE 조건을 만족하는 해가 구해지지 않는다. 따라서 주참여자를 변경할 필요가 있으며 휴리스틱IV에 의해 PTDf의 2번째 순서인 G4를 주참여자로 가정하고 G6의 발전력은 38로 고정하여 계산하면 표 4의 ③열과 같다. 이때에도 비혼잡상태에서의 선로조류가 19.99이고 혼잡상태 선로조류가 20.0이므로 NE 조건을 만족한다. 계산결과가 구체적으로 NE의 정의에 부합하는 가는 부록에서 검증한다.

임계발전용량은 기존 주참여자의 최대발전용량의 변화에 따라 주참여자가 바뀌는 순간의 발전용량을 의미하며 이때의 현상은 비혼잡상태와 혼잡상태가 점점 가까워져서 구분이 되지 않는다. 비혼잡상태에서의 혼잡선로의 선로조류는 최대용량에 미세하게 미달하는 것이다. 임계발전용량의 계산 결과, $q_{6Mcr}=40.265$ 이며 이때의 발전력은 $q_1 \sim q_5 = [42.03, 46.90, 23.83, 25.38, 23.78]$ 이고 G6는 $[40.265 + \epsilon, 40.265 - \epsilon]$ 의 값을 비혼잡과 혼잡전략으로 선택한다. 여기서 ϵ 은 아주 작은 값을 나타낸다. 부하전력도 비혼잡상태에서 8.087 MW, 혼잡상태에서는 $8.087 \pm \epsilon$ MW의 분포를 나타낸다.

균형상태에서 계산한 각 발전사들의 기대이득은 부록에서 소개되는데, G6의 발전용량이 작을수록 G6의 이득은 감소하고 다른 발전사들의 이득은 증가를 한다. 이 중 혼잡지배력을 넘겨받는 G4의 이득 증가가 가장 큼을 알 수 있다.

5. 결론

발전력 입찰시장의 전략적 모형에서 송전선 혼잡이 존재하는 경우 복합전략의 내쉬균형이 나타난다. 참여자의 수가 3인 이상이 되면 복합전략을 구하는 것이 매우 어려워져서 경험적 지식에 근거한 주참여자 개념과 선로조류분배계수(PTDf)를 이용하는 복합전략 내쉬균형 계산법이 소개된 바 있다. 본 연구에서는 이러한 연구결과에서 약점으로 지적되던 경쟁모형의 수정과 발전력 최대용량을 고려할 때의 계산법을 개선하였다. 송전선혼잡을 지배하는 주참여자의 발전최대용량이 쿠르노 내쉬균형의 발전력보다 작은 경우 발전최대용량을 비혼잡전략으로 선택을 한다. 또한 발전최대용량이 어떤 기준값보다 작은 경우에는 주참여자의 역할이 다른 참여자로 이전되는 현상을 제안하여 내쉬균형 계산기법에 활용하였다. 기준값이란 주참여자가 바뀌는 상황에서의 발전최대용량을 말하며 이를 임계발전용량이라는 개념으로 제안하였다.

적용은 6인이 참여하는 IEEE 30 모선 계통에 시도하여 복합전략 내쉬균형을 계산하고 주참여자의 최대발전용량이 내쉬균형이 미치는 영향을 분석하였으며 제안한 두 개의 경험적 규칙이 타당함을 확인하였다.

부 록 : 내쉬균형의 검증

사례연구에서 계산한 NE를 검증하기 위해서는 각 참여자의 발전력 변화 유인(incentive)이 없다는 것을 보여야

한다. 발전력 변화의 유인은 자신의 전략을 수정함으로써 이득의 증가가 있을 때 존재한다. 따라서 다음 그림 A.1 과 같이 각 발전사의 전략변화에 따른 기대이득이 표 4의 ①열 NE 값에서 최대값을 보이므로 NE 임이 검증된다. G6에서 두 개의 봉우리가 나타나는 것은 혼잡전략과 비혼잡전략에서 기대이득이 같음을 의미한다.

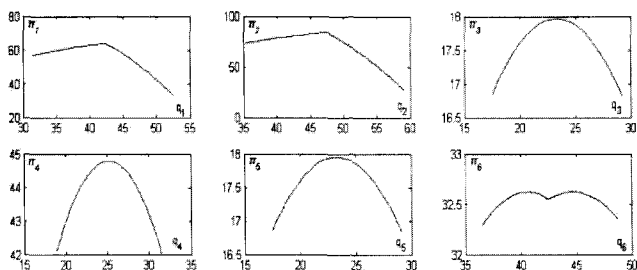


그림 A.1 전참여자의 기대이득 ($q_{6M}=50$)
Fig. A.1 Expected profits at NE ($q_{6M}=50$)

표 4에서 ②열의 NE에서 기대이득 분포는 그림 A.2와 같다. G6에서 q_6 의 범위는 42까지만 유효하므로 G6는 두 개의 혼잡, 비혼잡전략에서 동일한 기대이득을 갖는다. 또한 표 4의 ③열 NE에서는 그림 A.3과 같다.

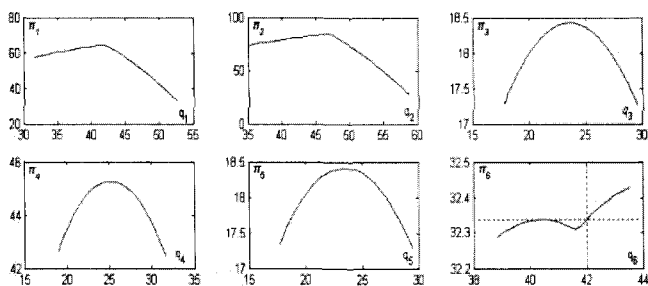


그림 A.2 전참여자의 기대이득 ($q_{6M}=42$)
Fig. A.2 Expected profits at NE ($q_{6M}=42$)

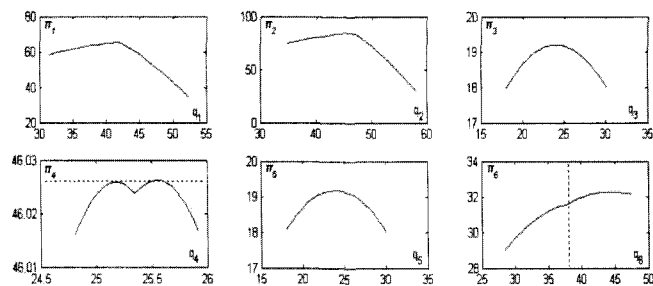


그림 A.3 전참여자의 기대이득 ($q_{6M}=38$)
Fig. A.3 Expected profits at NE ($q_{6M}=38$)

참 고 문 헌

[1] Roy Gardner, Games for Business and Economics, John Wiley& Sons, Inc. 2003.
[2] P.F. Correica, T.J. Overbye, and I.A. Hiskens, "Searching for noncooperative equilibria in centralized

electricity markets," IEEE Trans. Power Syst., Vol.18, No.4, pp.1417-1424, Nov. 2003.
[3] K.H. Lee and R. Baldick, "Tuning of discretization in bimatrix game approach to power system market analysis," IEEE Trans. Power Syst., Vol.18, No.2, pp.830-836, May 2003.
[4] K.H. Lee and R. Baldick, "Solving three-player games by the matrix approach with application to an electric power market," IEEE Trans. Power Syst., Vol.18, No.4, pp.1573-1580, Nov. 2003.
[5] J.D. Weber and T.J. Overbye, "An individual welfare maximization algorithm for electricity markets," IEEE Trans. Power Syst., Vol.17, No.3, pp.590-596, Aug. 2002.
[6] D. Fudenberg and J. Tirole, Game Theory. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
[7] A.L. Motto and F.D. Galiana, "Coordination in markets with nonconvexities as mathematical program with equilibrium constraints-part I: a solution procedure," IEEE Trans. Power Syst., Vol.19, No.1, Feb. 2004.
[8] C. Richter and G. Sheble, "Genetic algorithm evolution of utility bidding strategies for the competitive marketplace," IEEE Trans. Power Syst., Vol.13, No.1, pp.256-261, Feb.1998.
[9] K.H. Lee "Solving mixed strategy equilibria of multi-player games with a transmission congestion," Transaction of KIEE, Vol. 55A, No.11, pp.492-497, Nov. 2006.
[10] R. Baldick, "Electricity market equilibrium models: the effect of parametrization," IEEE Trans. Power Syst, Vol.17, No.4, pp.1170-1176, Nov. 2002.
[11] (전기학회 심사중) "Supply Function Nash Equilibrium Considering Stochastic Demand Function," available at <http://user.dankook.ac.kr/~gradelec/>
[12] Paul D. Klemperer and Margaret A. Meyer, "Supply function equilibria in oligopoly under uncertainty," Econometrica, vol.57, no. 6, pp. 1243-1277, November 1989.

저 자 소 개



이 광 호 (李 光 浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전기공학과 부교수.

Tel : 031-8005-3604

E-mail : khlee@dku.edu